

HCCI 디젤엔진 연료적용을 위한 DME 연료 미립화 및 증발특성

전문수* · 황용하* · 서현규** · 이창식†

Atomization and Evaporation Characteristics of DME Fuel for the Application of HCCI Diesel Engine

Mun Soo Chon, Yong Ha Hwang, Hyun Kyu Suh and Chang Sik Lee

Key Words: Dimethyl Ether(DME), Spray tip penetration(분무도달거리), HCCI(균일 예혼합 압축 착화), SMD(Sauter mean diameter)

Abstract

The objective of this work is to analyze the atomization and evaporation characteristics of dimethyl ether(DME) fuel for the application of HCCI diesel engine. In order to investigate the spray behavior of DME fuel, the macroscopic and microscopic characteristics were investigated in terms of spray development, spray tip penetration, impingement time, SMD, and axial mean velocity under the various injection timing and ambient conditions. For the illumination of spray, the spray visualization system was composed of a Nd:YAG laser and an ICCD camera and laser-sheet method was used. The atomization characteristics of DME fuel are analyzed by using phase Doppler particle analyzer (PDPA) system. It was revealed that the spray development of DME is slower and rapidly disappeared as elapsed time after start of injection at the same injection duration. The impingement timing of diesel fuel was faster than that of DME fuel. The comparison of spray atomization characteristics in both fuels shows that diesel fuel has a large SMD value than DME.

기호설명

DME	: Dimethyl ether
HCCI	: Homogenous charge compression ignition
PDPA	: Phase Doppler particle analyzer
AMD	: Arithmetic mean diameter
SMD	: Sauter mean diameter
T	: Temperature
t	: Time
P	: Pressure
L	: Distance between nozzle tip and piston head

1. 서론

균일 예혼합 압축 착화(Homogeneous Charge Compression Ignition; HCCI)엔진은 디젤의 높은 열효율을 유지하면서 질소 산화물(NO_x)과 입자상 물질(Particulate Matter, PM)을 획기적으로 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있어 전세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있다⁽¹⁾. HCCI 연소는 디젤 엔진에 상응하는 열효율을 가지고 있고, 배출물 저감에 큰 효과를 나타내지만, 낮은 연소실 압력 및 온도 조건에서 연료를 분사하여 혼합기를 형성하기 때문에 연료의 벽면 젖음 현상이 문제가 되고, 착화 및 연소의 제어 수단 없이 연소실내의 온도와 혼합기의 화학반응에 의하여 HCCI 엔진의 고유 연소가 연료 특성에 영향을 받아 운전영역이 크게 제한되는 단점을 가지고 있다⁽²⁾.

이러한 문제를 해결하기 위한 노력으로 디젤 엔진에서 대체연료를 이용한 유해 배기배출물 저감에 대한 연구가

(2006년 8월 29일 접수 ~ 2006년 9월 11일 심사완료)

*충주대학교 에너지시스템공학과

**한양대학교 대학원 기계공학과

†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : cslee@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-8963 FAX : (02)2281-5286

활발히 이루어지고 있다.

합산소 연료 중 디메틸 에테르(dimethyl ether, DME)는 세탄가가 높기 때문에 압축착화에 의한 디젤 사이클 운전이 가능하며 디젤엔진과 같은 수준의 열효율을 얻을 수 있고, PM을 거의 배출하지 않는 등 디젤엔진의 대체 연료로서 주목을 받고 있다⁽³⁾. 또한, DME는 천연가스나 석탄으로부터 생산이 가능해 국내 제조가 가능하고 최근에 저렴한 가격으로 DME를 제조할 수 있는 방법이 개발됨에 따라 차세대 연료로서 더욱 주목을 받고 있으며, DME 연료의 엔진 적용성 및 배출물 저감특성에 대한 연구는 그 동안 활발히 진행되어 왔다.

Kajitani 등⁽⁴⁾은 DME는 기화가 용이하고, PM을 거의 배출하지 않는다고 보고하였으며, Kapus 등⁽⁵⁾은 동일 조건의 압축착화 엔진에서 DME연료가 디젤 연료에 비하여 현저하게 적은 양의 PM이 배출되는 반면에 NO_x는 비슷하게 배출되는 것으로 발표하였다. Sato 등⁽⁶⁾은 DME를 연료로 사용한 압축 착화 엔진에 EGR을 적용하여 EGR율을 증가시켰을 경우에 NO_x가 디젤의 1/3 수준으로 감소한다고 발표한 바 있다.

그러나 이와 같은 장점에도 불구하고 DME는 발열량이 낮으며 탄성계수가 작고, 압축성이 높아서 충분한 연료 분사량을 확보하기 어려운 것으로 알려져 있다⁽⁷⁾. 또한, DME는 점도가 낮아서 연료 누설의 가능성이 있고, 기관 구동부에서의 윤활성 악화에 따른 마멸 문제가 예상되는 등⁽⁸⁾ 기존의 경유와 물성 차이가 크기 때문에 기존의 플런저 방식의 디젤기관에서 사용하기 어렵다.

따라서 DME의 최적 연료 분사계는 전자 제어를 통해 고압으로 연소실 내부에 연료를 직접 분사하는 커먼레일 방식이 적합한 것으로 인식되고 있다. Park 등⁽⁹⁾은 커먼레일 방식을 사용하여 DME의 분무발달과정을 분석한 결과 분무 특성이 디젤과 유사하다고 보고하였다.

이러한 연구에도 불구하고 DME연료의 분무 특성에 대한 불분명한 부분이 많으며, 특히 DME분무 발달과정과 미립화 특성에 대한 보다 심도있는 연구가 필요한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 커먼레일 방식 HCCI 디젤 엔진의 직분연료로 합산소 연료인 DME연료를 사용할 경우 DME의 분무 특성을 가시화하고, 디젤 연료와 DME연료의 분무 미립화 특성을 실험적으로 구하여 이들의 연소실 내의 분무 발달과정과 분무 특성을 비교하여 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

합산소 연료DME의 HCCI 디젤 엔진의 적용성을 파악하기 위하여 먼저 연료의 분사율 특성을 연구하였다. 분사율의 측정은 Fig. 1과 같은 Bosch법의 원리를 이용한 분사율 측정장치를 이용하였고, 분사특성 예측에 필요한 측정자료와 분사율이 미치는 영향을 예측하고자 하였다.

고압의 연료를 분사하기 위한 커먼레일 분사시스템을 Fig. 2와 같이 구성하였다. 커먼레일에 고압의 연료를 안정적으로 분사하기 위하여 두 개의 고압연료 펌프(Haskel, HSF-300)를 병렬로 연결하여 사용하였으며, 펌프로 공급되는 압축 공기의 압력을 이용하여 커먼레일 내의 연료 압력을 조절하였다.

커먼레일식 고압분사 시스템에서 상온에서 기상인 DME연료를 액상으로 바꾸기 위하여 질소가스를 이용하여 가압하였고, 분무 발달과정을 촬영하기 위한 가시화 시스템의 광원으로는 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 광학계로부터 형성된 레이저 시트빔을 이용하여 인젝터에서 분사되는 분무의 단면을 가시화하였다. 또한 ICCD카메라와 인젝터 드라이버(TEMS, TDA-3200H)를 디지털 신호 발생기(BNC, Model 555)를 이용하여 동기화 하였고, 이미지 그래버를 이용하여 분무 이미지를 취득하였다. 한편 DME의 분무 액적 입경과 속도를 구하기 위해 PDPA 시스템을 사용하였다. PDPA시스템을 사용한 실험 장치는 Fig. 2와 같으며, 광원은 5W출력의 Ar-ion 레이저를 사용하였다. 분무 가시화 및 PDPA 시스템의 주요 제원은 Table 1과 같다.

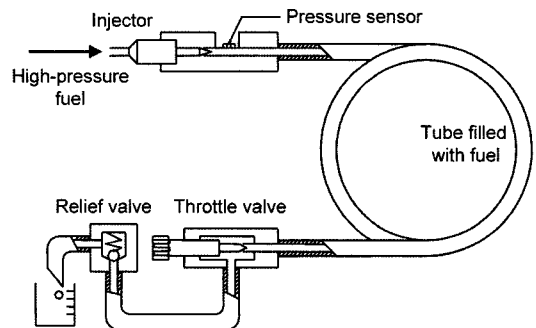


Fig. 1 Schematics diagram of injection rate measuring system

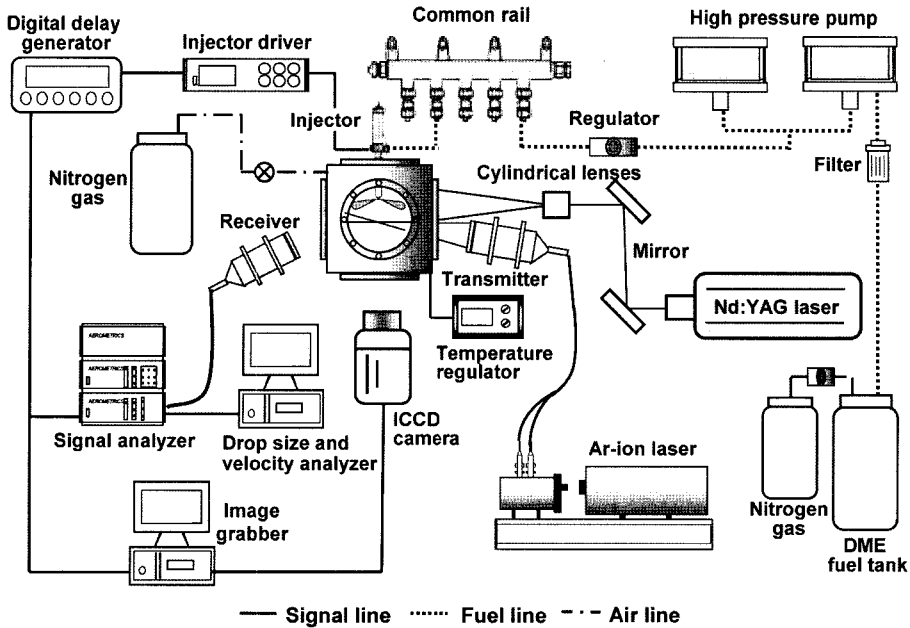


Fig. 2 Schematics of spray visualization and droplet analysis systems

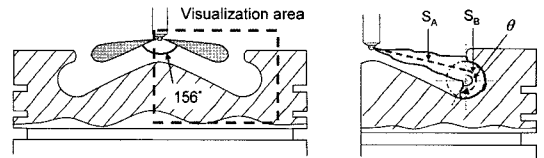
Table 1 Specifications of spray visualization system and droplet analysis systems

Spray visualization system	Light source	Nd:YAG
	Wave length	532 nm
	Laser power	270 mJ
	Beam thickness	~1 mm
	Resolution	1280×1024
Phase Doppler particle measuring system	Light source	Ar-ion
	Wave length	514.5 nm, 488 nm
	Focal length	500 mm for transmitter and receiver
	Collection angle	30°

2.2 실험방법

HCCI 디젤엔진의 혼합소 연료 적용 특성을 연구하기 위해 Fig. 3과 같은 연소실 챔버를 이용하여 실험을 수행하였다. 또한 분사의 시작점은 인젝터의 노즐 팁에서 분무가 보이는 시점으로 정의하였으며, 연소실 챔버 내에서 분무의 도달거리를 Fig. 3와 같이 구하였다.

본 실험에 사용된 인젝터는 노즐의 지름이 0.167 mm 인 미니색 형태(mini-sac type)의 5공 노즐을 사용하여



Spray tip penetration $S = S_A + S_B$ $S_B = R \times \left(\frac{\pi}{180} \times \theta \right)$

Fig. 3 Schematics of combustion chamber geometry

실험을 수행하였으며, Fig. 4에 본 연구에 사용된 인젝터의 제원을 나타내었다.

이와 같은 연료 인젝터를 사용하여 DME 연료의 분무 발달과정 및 미립화 특성을 디젤 연료와 비교 분석하기 위하여 실험을 수행하였다. 먼저 분무 가시화를 위하여 연료의 분사압력은 60 MPa, 분위기 압력은 질소가스로 가압된 고압 챔버에서 3.5 MPa로, 분위기 온도는 293K, 393K, 493K의 조건에서 실험을 수행하였다. 또한 DME연료의 분무 미립화 특성을 구하기 위하여 분사압력은 동일하게 60 MPa에서 실험하였으며, 분사기간은 1.0 ms로 고정하였다. 이때, 연료의 미립화 특성은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 인젝터 축 방향하류 5 mm부터 60 mm까지 5 mm간격으로, 반경방향은 최대 10 mm까지 2 mm간격으로 측정을 하였으며, 구체적인 실험조건은 Table 2에 나타내었다.

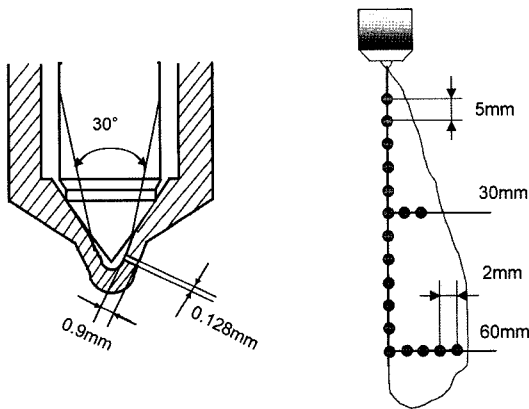


Fig. 4 Test injector and measuring points

Table 2 Experimental conditions

Spray visualization system	
Injection system	Common-rail
Injection pressure(P_{inj})	60 MPa
Energizing duration (t_{eng})	0.5, 1.0 ms
Piston distance(L_w)-ambient pressure(P_{amb})	1 mm-3.5 MPa
Ambient pressure(T_{amb})	293, 393, 493K
Droplet analysis system	
Injection pressure(P_{inj})	60 MPa
Energizing duration (t_{eng})	1.0 ms
Ambient pressure(P_{amb})	0.1 MPa
Ambient pressure(T_{amb})	293K

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 DME 연료의 분사율 특성

Figure 5는 디젤 연료와 DME연료의 인젝터 통전시간에 따른 분사율 특성을 비교한 것이다. 두 연료 모두 통전시간이 길어질수록 분사율이 증가되는 특성을 보였으며, 분사지연시간(injection delay)의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 반면에 최대 분사율에 도달하는 시간은 디젤의 경우가 DME보다 약 0.2 ms 정도 빠른 것으로 나타났다.

3.2. DME 연료의 분무 발달과정

본 연구에서는 DME연료의 연소실 내에서의 거시적인 분무 발달과정을 분석하기 위하여 분무도달거리, 분

무의 연소실내의 충돌시기와 분무 영역에 대하여 실험하였으며, 연소실 내에서의 분무 발달과정을 Fig. 6에 나타내었다. 동일한 분사시간에 연소실 내에서 DME 연료의 분무 발달과정은 디젤에 비하여 늦고, 분무의 밀도가 낮은 것으로 나타났다. 이는 디젤연료에 비하여 DME연료의 증발특성이 우수하여 연소실 내의 증발이 빨리 일어나기 때문이며, 이로 인하여 연소실 벽면의 젖음 현상(wall wetting)을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

분사시간이 1.0 ms인 경우, DME 연료의 분무발달과정은 분사시간 0.5 ms의 디젤연료와 비슷한 경향을 나타내는 것으로 나타나 DME연료가 연소실내에서 디젤과 동일한 분무의 밀도를 얻기 위해서는 약 2배의 분사시간이 필요한 것으로 판단된다.

한편, Fig. 7과 Fig. 8은 각각 연소실 내의 분위기 온도가 디젤 연료와 DME연료의 분무 도달거리에 미치는 영향을 비교하여 나타낸 것이다.

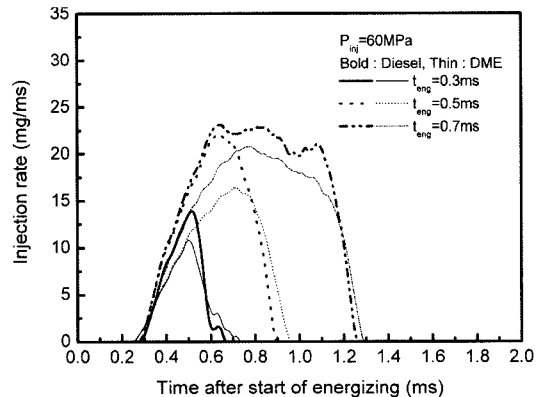


Fig. 5 Comparison of injection rate of DME with diesel according to energizing duration ($P_{inj} = 60$ MPa, $P_{amb} = 3.5$ MPa)

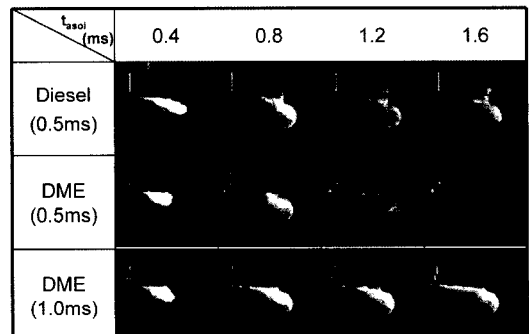


Fig. 6 Spray development process in combustion chamber ($P_{inj} = 60$ MPa, $P_{amb} = 3.5$ MPa)

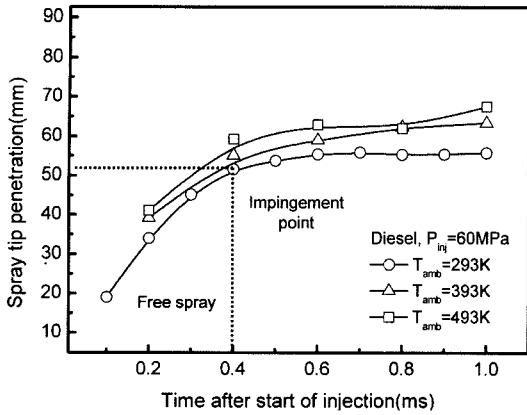


Fig. 7 Effect of ambient temperature on the spray development process of diesel fuel ($P_{inj} = 60 \text{ MPa}$, $P_{amb} = 3.5 \text{ MPa}$, $t_{eng} = 0.5 \text{ ms}$)

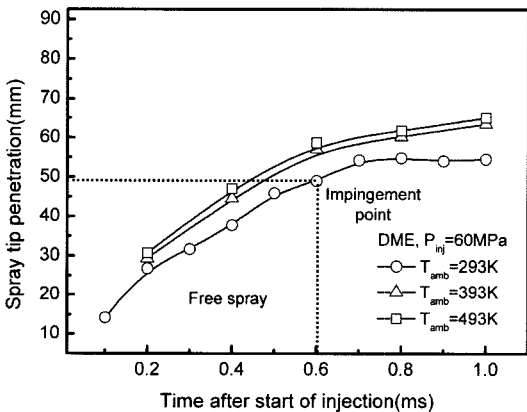


Fig. 8 Effect of ambient temperature on the spray development process of DME fuel ($P_{inj} = 60 \text{ MPa}$, $P_{amb} = 3.5 \text{ MPa}$, $t_{eng} = 0.5 \text{ ms}$)

먼저 디젤 연료의 분무 도달거리를 나타낸 Fig. 7을 살펴보면, 분위기 온도가 증가할수록 낮아지는 분위기 밀도와 연료 증발의 영향으로 분무 도달거리는 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 디젤 연료의 벽면 충돌 시간은 분사 시작 후 약 0.4 ms에 일어나는 것으로 나타났다.

Figure 8은 DME 연료의 분무 도달거리를 나타낸 것이다. DME 연료의 경우에도 높은 연소실 분위기 온도는 연료의 증발을 촉진시켜 분무 도달거리가 증가하는 것으로 나타났다. 분무의 충돌시간의 경우에는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 DME연료의 분무 발달 속도가 디젤에 비하여 늦어, 디젤보다 약 0.2 ms 이후인 분사 시작 후 0.6 ms시점에 벽면충돌이 일어났다.

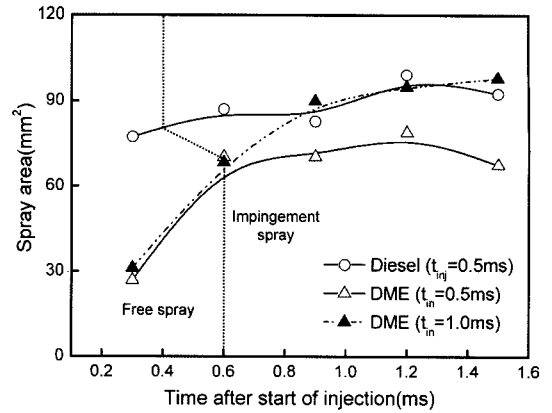


Fig. 9 Comparison of spray area in the combustion chamber ($P_{inj} = 60 \text{ MPa}$, $P_{amb} = 3.5 \text{ MPa}$)

따라서 본 연구에 적용된 실험 조건의 경우, 분사 시작 후 약 0.6 ms 이전에는 디젤 연료의 분무 도달거리가 DME에 비하여 긴 것으로 나타났고, 0.6 ms 이후에는 차이가 없었으며, 분위기 온도가 증가함에 따라 두 연료의 분무 도달거리는 점차 증가하는 경향을 보였다. 분무의 충돌시간의 경우 디젤 연료의 분무 밀도가 높고, 성장 속도가 빨라 DME에 비하여 연소실 벽면에 빨리 충돌하고 있음을 알 수 있다.

Figure 9는 디젤 및 DME 연료의 연소실내의 분무영역을 나타낸다. 동일한 분사기간에서의 분무영역은 디젤이 크고, 특히 분사초기에 디젤의 분무영역이 빠른 속도로 증가함을 알 수 있다. 이는 분사를 특성에서 볼 수 있듯이 디젤 연료의 분사속도가 DME 보다 빠르고, 분무가 연소실내에 높은 밀도로 넓게 분포하고 있기 때문이다. 분사기간이 1.0ms로 늘어난 경우에는 분사 시작 후 약 0.8 ms 이후에 두 연료의 분무 영역이 비슷해지는 것으로 나타났다.

3.3 DME 연료의 미립화 특성

연료의 물성치에 따른 디젤과 DME연료의 분무 미립화 특성을 분사 시작 후 경과 시간에 따라 Fig. 10에 나타내었다. DME 연료의 분무 미립화 특성을 심층적으로 구하기 위하여 디젤과 DME 연료의 AMD(D_{10})과 SMD(D_{32})를 측정하였다.

AMD의 경우 약 10~15 μm 의 일정한 값을 가지는 것으로 나타났고, SMD의 경우 두 연료 모두 인젝터 노즐 근처에서 최대값을 보인 후, 분무 하류 방향으로 이동할수록 감소하는 경향을 보였다. 이는 분무의 내부 구조가 미립화가 활발히 진행되는 분사초기에 인젝터 노즐 부

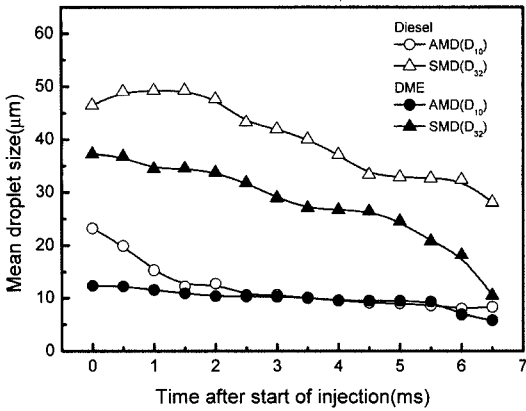
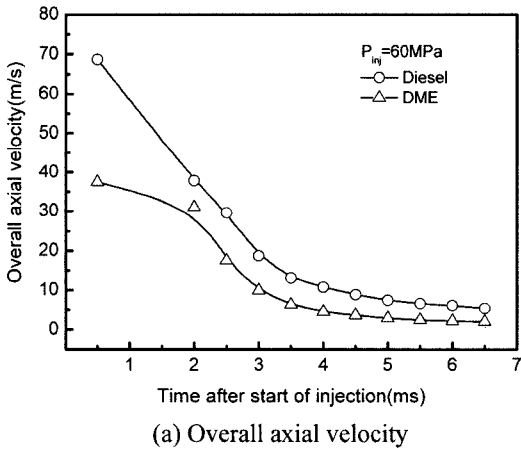
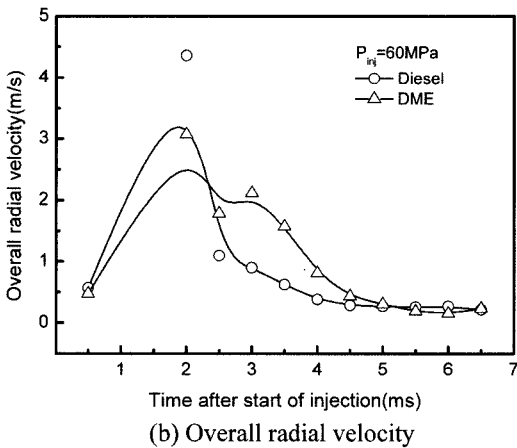


Fig. 10 Comparison of measuring droplet size distribution ($P_{inj} = 60 \text{ MPa}$, $P_{amb} = 0.1 \text{ MPa}$, $t_{eng} = 1.0 \text{ ms}$)



(a) Overall axial velocity



(b) Overall radial velocity

Fig. 11 Comparison of overall axial and radial velocity distribution ($P_{inj} = 60 \text{ MPa}$, $P_{amb} = 0.1 \text{ MPa}$, $t_{eng} = 1.0 \text{ ms}$)

근에서 급격한 변화를 보이기 때문인 것을 판단된다. 또한 DME의 SMD값이 디젤에 비하여 낮은 것으로 나타났는데, 이는 디젤에 비하여 약 20%정도 낮은 DME의 동점도와 표면장력이 분무의 증발과 미립화를 촉진시키기 때문으로 판단된다.

Figure 11은 분사 시작 후 경과 시간에 따른 축방향 속도와 반경 방향 속도를 나타낸 것이다. Fig. 11의 (a)에서 볼 수 있듯이 축 방향 속도의 경우, 두 연료 모두 분사 직후 최대 속도를 나타내고, 시간의 경과에 따라 점차 감소하여 약 10 m/s 부근에서 일정한 속도를 나타내었다. 또한, 디젤 연료가 DME에 비하여 빠른 속도 분포의 경향을 보였다. 분사 시작 후 경과 시간에 따른 반경방향 속도의 경우에도 거의 동일한 경향을 나타내었다. 이와 같은 결과로부터, DME 연료가 디젤에 비하여 분사나 미립화의 특성이 우수한 것으로 사료된다.

4. 결 론

커먼레일 방식 HCCI 디젤 엔진에 직분연료로 합산소 DME연료를 적용하기 위하여 디젤과 DME의 분무 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 연료의 분사율을 비교한 결과, 최대 분사율에 도달하는 기간은 디젤의 경우가 DME보다 약 0.2 ms 정도 빠른 것으로 나타났다.

2) 동일한 분사기간에서 연소실 내에서 DME 연료의 분무 발달과정은 디젤 연료에 비하여 느리며, 분무의 밀도가 낮은 것으로 나타났다. 이러한 경향은 디젤에 비하여 DME의 증발특성이 우수하여 연소실 내의 증발이 빨리 일어나기 때문이며, 이로 인하여 연소실 벽면의 젖음 현상을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

3) 디젤의 분무 도달거리가 분사 시작 후 0.6 ms 이전에는 DME에 비하여 긴 것으로 나타났으며, 0.6 ms 이후에는 특별한 차이가 없었다. 분무의 충돌시간은 디젤의 분무 밀도가 높고, 성장 속도가 빨라 DME에 비하여 약 0.2 ms정도 연소실 벽면에 빨리 충돌하는 것으로 나타났다.

4) 고온의 분위기 온도에서 주위 분위기 밀도의 감소와 DME의 증발이 활발해져서 분무 도달거리가 증가하는 것으로 나타났다.

5) 분무 입경은 DME의 SMD값이 디젤에 비하여 작은 것으로 나타났는데, 이것은 디젤에 비하여 약 20%정도 낮은 DME의 동점도가 분무의 증발과 미립화를 촉진

진시키기 때문에 판단된다. 축 방향 속도의 경우에는 디젤 연료가 DME에 비하여 빠른 경향을 보였다.

후 기

본 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2004-003-D00062)에 의하여 연구되었으며, 연구를 지원해 주신 관계 기관에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) H. S. Rudolf and E. R. Charles, "Homogenous charge compression ignition (HCCI) : Benefits, Compromises and future engine applications," SAE paper, 1999-01-3682, 1999.
- (2) Y. H. Yoon, D. S. Kim, and C. S. Lee, "Effects of pre-mixed fuel and EGR on the combustion and emissions characteristics of HCCI diesel engine," KSME transaction, Vol. 29, No. 9, pp. 1006-1012, 2005.
- (3) Y. J. Lee, "Dimethyl-Ether as alternative diesel fuel," Journal of the Korea Society of Automotive Engineers, Vol. 23, No. 2, pp. 43-49, 2001.
- (4) S. Kajitani, M. Ogura and T. Mori, "DME fuel blends for low emission, direct injection diesel engines," SAE paper, 2000-01-2004, 2000.
- (5) P. Kapus and H. Ofner, "Development of fuel injection equipment and combustion system for DI diesel operated on Dimethyl Ether," SAE paper, 950062, 1995.
- (6) Y. Sato, A. Noda, T. Sakamoto and Y. Goto, "Performance and emission of a DI diesel engine operated on Dimethyl Ether applying EGR with supercharging," SAE 2000-01-1809, 2000.
- (7) D. Gill, H. Ofner, E. Sturman, J. Carpenter and M. A. Wolberton, "Production feasible DME Technology for Direct injection CI engines," SAE 2001-01-2015, 2001.
- (8) S. C. Sorence, M. Glensvig and D. L. Abata, "Dimethyl Ether in diesel fuel injection system," SAE 981159, 1998.
- (9) J. H. Park, H. K. Suh, S. W. Park and C. S. Lee, "Spray development process of diemethyl ether (DME)," Transactions of the Korea society of automotive engineers, Vol. 1, pp. 369-374, 2005.